

# Optimasi Kecepatan Sudut Keluaran Kopeling Universal pada Poros Seri

Muhammad Fajar

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mataram, Mataram

E-mail: t\_mesin\_unram@yahoo.co.id

## ABSTRAK

Pada umumnya mekanisme batang penghubung sistem kemudi menggunakan tipe sambungan kopeling universal yang memiliki karakteristik khas yaitu menghasilkan kecepatan sudut keluaran yang fluktuatif. Sebagai akibatnya, hal ini akan mempengaruhi tingkat kemampuan pengontrolan gerakan kendaraan. Kondisi ideal pengontrolan dapat dicapai jika kecepatan sudut masukan dari roda kemudi sama dengan kecepatan sudut poros keluaran yang terhubung ke kotak kemudi servo (*power steering*). Pada kondisi ini, pengontrolan gerakan kendaraan oleh pengemudi menjadi lebih mudah (*fully handle*). Oleh sebab itu, dalam penelitian ini dilakukan optimasi kecepatan sudut keluaran sebuah poros seri yang terhubung dengan kopeling universal atau juga dikenal dengan kopeling Hook. Sistem seperti ini umumnya diterapkan pada sistem penghubung kemudi kendaraan-kendaraan besar atau truk. Optimasi dilakukan melalui pembuatan paket perangkat lunak *Shaft Series Optimisation* (SSO) berbasis *Optimisation Toolbox* dari MATLAB. Berdasarkan hasil perhitungan melalui paket SSO diperoleh hasil bahwa untuk tiga buah sambungan dengan empat buah poros seri ternyata kecepatan sudut masukan dan keluaran poros seri akan mendekati sama pada sudut operasi lebih kecil daripada  $25^\circ$  dan sudut fasa pada  $90^\circ$ .

**Kata kunci:** Optimasi, kopeling universal, kecepatan sudut, poros seri, kemudi, pemrograman tak linier.

## ABSTRACT

*The shafts in the steering linkage are connected by universal joints. These joints has characteristic producing fluctuation in the output angular velocity. So, this can cause a problem for steering linkage as the fluctuation of the output steering shaft. Furthermore, it will affect the ability to control the moving of the vehicle. Ideally, the input and the output angular velocity of the steering wheel should be equal so that the controlling of the vehicle motion by the driver could be easily or fully handling. In this research the output angular velocity of a series shafts connected by universal joint or also popular called Hooke's joint is optimised. It is usually applied in huge vehicles or truck steering linkage connection system. The optimisation will be done by developing Shaft Series Optimisation (SSO) package by utilising MATLAB Optimisation Toolbox. From the result of calculations using the developed software package it can be concluded that the output velocity of the series shafts approximates the input velocity at the operating angle less than  $25^\circ$  and at the phase angle of  $90^\circ$ .*

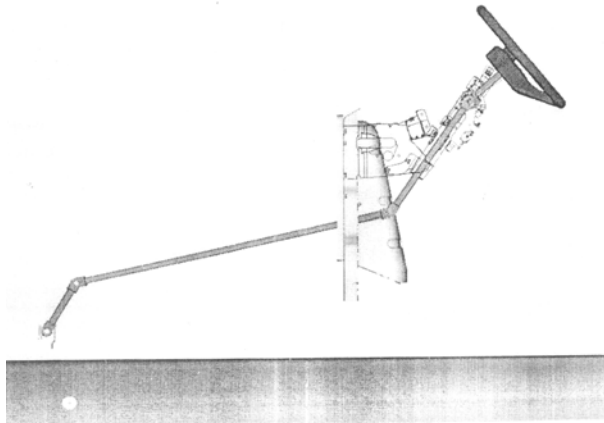
**Keywords:** *Optimisation, universal joint, angular velocity, shaft series, steering, non-linear programming.*

## PENDAHULUAN

Pada umumnya mekanisme batang penghubung sistem kemudi menggunakan tipe sambungan kopeling universal. Sambungan ini memiliki karakteristik yang khas, yaitu dalam satu putaran menghasilkan kecepatan sudut keluaran yang berfluktuasi. Oleh karena itu, diperlukan kecermatan dan ketrampilan khusus bagi pengemudi untuk mengontrol arah gerak kendaraan. Untuk mengatasi permasalahan ini diperlukan disain mekanisme batang

penghubung pada sistem kemudi yang dapat mempermudah pengendalian arah gerak kendaraan. Hal tersebut dapat dicapai melalui upaya sehingga besarnya kecepatan sudut roda kemudi menghasilkan besar kecepatan sudut poros keluaran yang sedapat mungkin sama pada sistem kemudi yang tersambung ke kotak kemudi servo. Berkaitan dengan usaha ini, maka perlu didisain sudut operasi dan sudut fasa yang paling optimal. Agar tidak memakan waktu lama dan sulit, maka optimasi tidak dilakukan dengan pendekatan coba dan salah

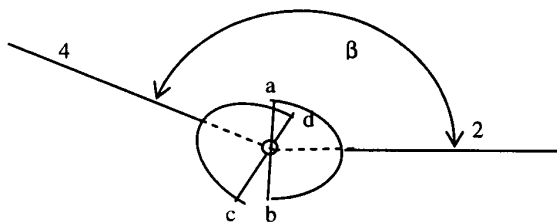
(*trial and error approach*). Untuk itu, didisain melalui pemanfaatan komputer.



**Gambar 1. Pandangan Samping Model Mekanisme Batang pada Sistem Kemudi**

## Kinematika Kopeling Universal

Berikut adalah analisa kinematika kopeling universal tunggal yang diambil dari referensi pustaka [1], [2], dan [3]. Pada kopeling universal satu putaran poros penggerak (*driver*) yang berputar dengan kecepatan sudut konstan menghasilkan putaran poros yang digerakkan (*follower*) dengan kecepatan sudut yang bervariasi. Besarnya variasi merupakan fungsi dari sudut operasi  $\beta$  yaitu sudut yang dibentuk antara poros penggerak 2 dan poros yang digerakkan 4, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.



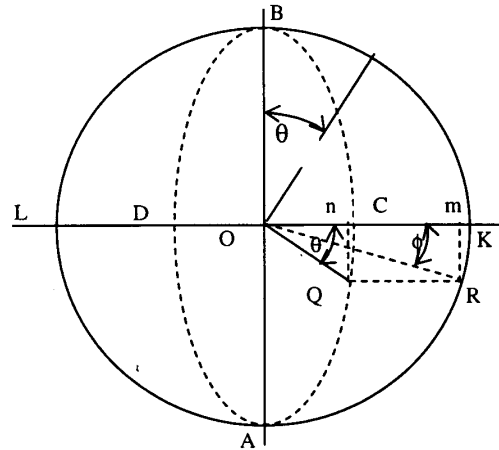
### Gambar 2. Mekanisme Batang pada Kopeling Universal

Jika diambil proyeksi tegak lurus terhadap poros 2 maka gerakan dari titik a dan b (rahang penggerak) merupakan lingkaran AKBL pada Gambar 3. Gerakan dari titik c dan d (rahang yang digerakkan) merupakan sebuah lingkaran yang terproyeksi sebagai elips ACBD seperti Gambar 3, di mana:

$$OC = OD = OK \cos \beta = OA \cos \beta \quad (1)$$

Jika salah satu lengan rahang penggerak berada di posisi A, maka lengan rahang yang digerakkan akan berada di C. Kemudian, jika lengan rahang penggerak berputar ke R, maka lengan rahang yang digerakkan akan berpindah ke Q. QQ

akan tegak lurus terhadap OR, oleh karena itu COQ atau  $\theta$  merupakan proyeksi sudut yang sebenarnya dari rahang yang digerakkan. Qn adalah komponen dari gerakan yang digerakkan dalam arah yang sejajar dengan AB yang merupakan garis perpotongan antara bidang penggerak dengan bidang yang digerakkan.



### Gambar 3. Analisa Trigonometri dari Kopeling Universal

Sudut  $\phi$  adalah sudut yang dibentuk oleh yang digerakkan, sedang sudut  $\theta$  dibentuk oleh penggerak. Selanjutnya dapat ditentukan dengan melihat lingkaran AKBL bahwa OR sama dengan OQ, dan ROK sama dengan sudut  $\phi$  sama dengan COQ sama dengan sudut  $\theta$  sehingga:

$$\tan \phi = R_m / O_m \quad (2)$$

$$\tan \theta = Q_n / O_n \quad (3)$$

Karena  $Q_n$  sama dengan maka:

$$\frac{\tan \theta}{\tan \phi} = \frac{Om}{On} = \frac{OK}{OC} = \frac{1}{\cos \beta} \quad (4)$$

Oleh karena itu:

$$\tan \phi = \cos \beta \cdot \tan \theta \quad (5)$$

Selanjutnya rasio antara kecepatan sudut poros yang digerakkan terhadap poros penggerak dapat dicari dengan menurunkan persamaan (4) dan perlu diingat bahwa  $\beta$  diset selalu konstan:

$$\frac{\omega_4}{\omega_2} = \frac{d\phi}{d\theta} = \frac{\cos \beta \sec^2 \theta}{\sec^2 \phi} = \frac{\cos \beta \sec^2 \theta}{1 + \tan^2 \phi} \quad (6)$$

Eliminasi  $\phi$  menghasilkan:

$$\frac{\omega_4}{\omega_3} = \frac{\cos \beta \sec^2 \theta}{1 + \cos^2 \beta \tan^2 \theta} = \frac{\cos \beta}{1 - \sin^2 \beta \sin^2 \theta} \quad (7)$$

Sehingga persamaan kecepatan sudut antara poros penggerak-poros yang digerakkan atau persamaan masukan–keluaran adalah:

$$\frac{\omega_4}{\omega_\gamma} = \frac{\cos \beta}{1 - \sin^2 \beta \sin^2 \theta} \quad (8)$$

Sesuai dengan persamaan (8), jika poros penggerak memiliki kecepatan sudut yang tetap, maka

rasio kecepatan sudut akan bervariasi antara maksimum sebesar  $\frac{1}{\cos \beta}$  pada saat  $\cos \theta$  sama dengan  $\pm 1$  atau sudut  $\theta$  sama dengan  $0^\circ$ ,  $180^\circ$ , dst dan minimum sebesar  $\cos \beta$  pada saat  $\cos \theta$  sama dengan 0 atau  $\theta$  sama dengan  $90^\circ$ ,  $270^\circ$ , dst. Variasi kecepatan sudut ini dapat meningkatkan gaya inersia, torsi, noise, and getaran.

### Analisa Kopeling Universal pada Poros Seri

Dalam penelitian ini dianalisa sistem penghubung dengan tiga kopeling universal dengan empat poros saja. Namun jika nantinya dikehendaki lebih dari tiga sambungan dapat dilakukan adaptasi sesuai dengan permintaan. Persamaan kecepatan sudut poros masukan-keluaran dapat dianalisa sebagai berikut:

- Kecepatan sudut dari poros kedua adalah merupakan persamaan kecepatan sudut dengan sebuah kopeling universal yaitu:

$$\omega_2 = \omega_1 \frac{\cos \beta_1}{1 - \sin^2 \beta_1 \sin^2 \theta} \quad (9)$$

- Kemudian kecepatan sudut untuk poros ketiga adalah:

$$\omega_3 = \omega_2 \frac{\cos \beta_2}{1 - \sin^2 \beta_2 \sin^2 (\theta + \varphi_1)} \quad (10)$$

di mana:  $\varphi_1$  = sudut fasa dari kopeling universal kedua relativ terhadap kopeling universal pertama.

- Substitusi persamaan (9) ke dalam persamaan (10) menghasilkan:

$$\omega_3 = \omega_1 \left( \frac{\cos \beta_1}{1 - \sin^2 \beta_1 \sin^2 \theta} \right) \left( \frac{\cos \beta_2}{1 - \sin^2 \beta_2 \sin^2 (\theta + \varphi_1)} \right) \quad (11)$$

- Selanjutnya, kecepatan sudut poros keempat adalah

$$\omega_4 = \omega_3 \frac{\cos \beta_3}{1 - \sin^2 \beta_3 \sin^2 (\theta + \varphi_2)} \quad (12)$$

di mana:  $\varphi_2$  = sudut fasa dari kopeling universal ketiga relativ terhadap kopeling universal kedua

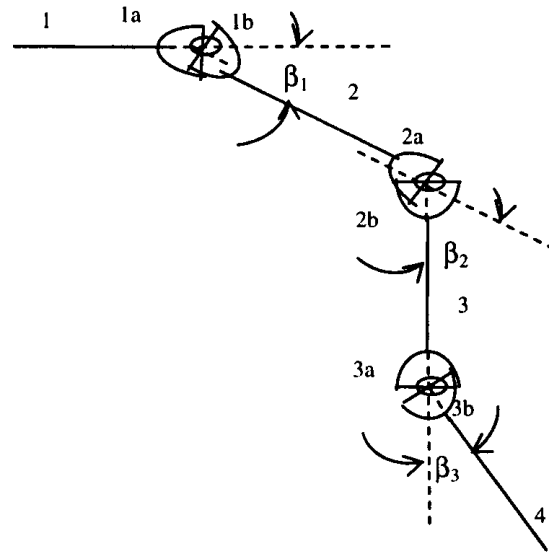
- Substitusi persamaan (11) ke dalam persamaan (12) menghasilkan:

$$\omega_4 = \omega_1 \left( \frac{\cos \beta_1}{1 - \sin^2 \beta_1 \sin^2 \theta} \right) \left( \frac{\cos \beta_2}{1 - \sin^2 \beta_2 \sin^2 (\theta + \varphi_1)} \right) \left( \frac{\cos \beta_3}{1 - \sin^2 \beta_3 \sin^2 (\theta + \varphi_2)} \right) \quad (13)$$

Pada disain yang umum diaplikasikan setiap rahang kopeling universal dipasang membelakangi dan segaris terhadap porosnya masing-masing sebagaimana terlihat pada gambar di bawah. Rahang 1b ditempatkan membelakangi rahang 2a dan keduanya segaris terhadap poros 2. Demikian juga rahang 2b terhadap rahang 3a di poros ketiga.

Dari hal ini dapat disimpulkan bahwa untuk disain yang normal semua sudut fasa adalah sebesar  $90^\circ$ . Ini berarti kopeling universal kedua mempunyai posisi seperempat lingkaran lebih dulu dibandingkan dengan posisi kopeling universal pertama dan kopeling universal ketiga berposisi seperempat lingkaran lebih dulu dibandingkan

dengan posisi kopeling universal kedua atau setengah lingkaran lebih dulu bila dibandingkan dengan posisi kopeling universal pertama.



Gambar 4. Poros Seri dengan Tiga Kopeling Universal

### METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan berdasarkan metode optimasi taklinear dengan batasan yang diterapkan pada paket perangkat lunak SSO. Metoda ini memanfaatkan fasilitas pada MATLAB *optimisation toolbox*.

### Fungsi Obyektif

Fungsi obyektif U dalam optimasi ini merupakan kesalahan sisa (*Residual Error*/RE) dari kecepatan sudut masukan-keluaran poros seri dengan sambungan kopeling universal. RE adalah kuadrat dari selisih antara kecepatan sudut poros keluaran dengan poros masukan yang nanti diusahakan agar berharga mendekati nol. Secara matematis fungsi obyektif ini dapat ditulis sebagai :

$$U = (\omega_{out} - \omega_{in})^2 \quad (14)$$

dimana:

$\omega_{in}$  = kecepatan sudut poros masukan

$\omega_{out}$  = kecepatan sudut poros keluaran

Misalkan jumlah sambungan yang dipergunakan ada tiga buah maka analisa fungsi obyektifnya adalah:

$$\text{Karena, } \omega_{in} = \omega_1 \quad (15)$$

dan,

$$\omega_{out} = \omega_4 = \omega_1 \left( \frac{\cos \beta_1}{1 - \sin^2 \beta_1 \sin^2 \theta} \right) \left( \frac{\cos \beta_2}{1 - \sin^2 \beta_2 \sin^2 (\theta + \varphi_1)} \right) \left( \frac{\cos \beta_3}{1 - \sin^2 \beta_3 \sin^2 (\theta + \varphi_2)} \right) \quad (16)$$

Sehingga,

$$U = \omega_1 \left( \left( \frac{\cos \beta_1}{1 - \sin^2 \beta_1 \sin^2 \theta} \right) \left( \frac{\cos \beta_2}{1 - \sin^2 \beta_2 \sin^2 (\theta + \varphi_1)} \right) \right) \left( \frac{\cos \beta_3}{1 - \sin^2 \beta_3 \sin^2 (\theta + \varphi_2)} \right) - 1 \quad (17)$$

Fungsi obyektif selanjutnya akan berbeda bergantung kepada jumlah sambungan.

### Batasan (Constraints)

Batasan (*constraints*) pada optimasi ini adalah besarnya sudut operasi  $\beta_i$  dan sudut fasa maksimum dan minimum. Besarnya sudut operasi bergantung pada situasi dan kondisi pemasangan komponen-komponen dalam kendaraan. Pemasangan mekanisme batang penghubung ini biasanya harus menghindari berbagai komponen lain yang terpasang. Untuk optimasi yang baik, sudut operasi maksimum ( $\beta_{\max}$ ) tidak melebihi  $40^\circ$ , dan minimumnya ( $\beta_{\min}$ ) bebas sesuai keinginan pengguna. Secara matematis, besar sudut operasi dapat dinyatakan sebagai berikut

$$\beta_{\min} < \beta_i < \beta_{\max} = 40^\circ \quad (18)$$

dimana

$\beta_i$  = sudut operasi optimal yang dicari

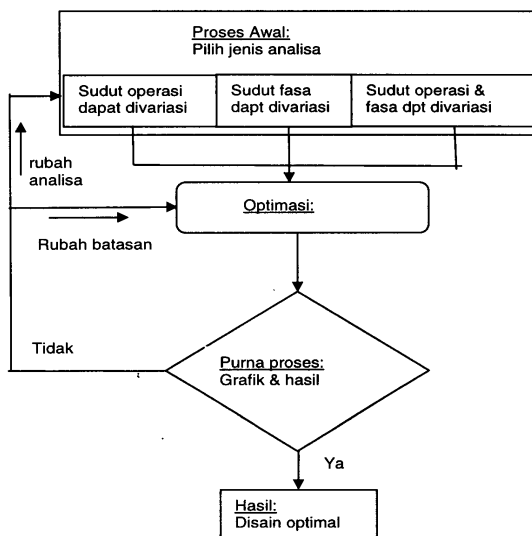
Sedang besarnya sudut fasa ditentukan antara  $0^\circ$  hingga  $180^\circ$ .

### Variabel Disain

Variabel disain terdiri dari dua variabel bebas yaitu sudut operasi dan sudut fasa ( $\varphi_i$ ). Sistem optimasi dirancang sedemikian rupa sehingga pengguna bebas menentukan variabel disain mana yang hendak dipakai.

### Rancangan Perangkat Lunak

Paket rancangan SSO terdiri dari tiga proses, yaitu Proses Awal, Optimasi dan Purna Proses. Organisasi paket SSO ditunjukkan melalui diagram alir berikut:



Gambar 5. Organisasi Paket Program SSO

Proses awal digunakan untuk memilih disain variabel yang akan dipergunakan dalam optimasi. Pengguna harus menentukan salah satu dari tiga pilihan yang disediakan. Pilihan 1, sudut operasi  $\beta_i$  bebas ditentukan oleh pengguna sesuai dengan kebutuhan dan kondisi peletakan komponen, sedang sudut fasa  $\varphi_i$  dioptimalkan. Pilihan 2, sudut operasi  $\beta_i$  dioptimalkan, sedang sudut fasa  $\varphi_i$  ditetapkan pada kondisi sudut yang normal, yaitu  $90^\circ$ . Pilihan 3, baik sudut operasi  $\beta_i$  maupun sudut fasa  $\varphi_i$  keduanya dioptimalkan, artinya pengguna tidak dapat menentukan sendiri besar nilai sudut operasi dan fasa. Setelah disain variabel dipilih, maka kita harus memasukkan nilai batas (*constraints*) yang diinginkan.

Optimasi yang digunakan adalah *fmincon* fungsi optimasi yang tersedia dalam MATLAB *optimisation toolbox*. *fmincon* menggunakan metode pemrograman kuadrat berurutan sebagai algoritmanya untuk memecahkan persoalan pemrograman taklinear dengan batasan [4]. Menurut Biggs [5], Han [6], dan Powell [7,8] metode ini memberikan hasil yang sangat dekat dengan metode Newton untuk optimasi dengan batasan dijalankan sebagai optimasi tanpa batasan. Dalam metode *quasi-Newton*, pada setiap iterasi pendekatannya menggunakan fungsi *Lagrangian Hessian*. Ulasan tentang pemrograman kuadrat berurutan dapat dibaca dalam Fletcher [9], Gill et al [10], Powell [11], and Schittowski [12].

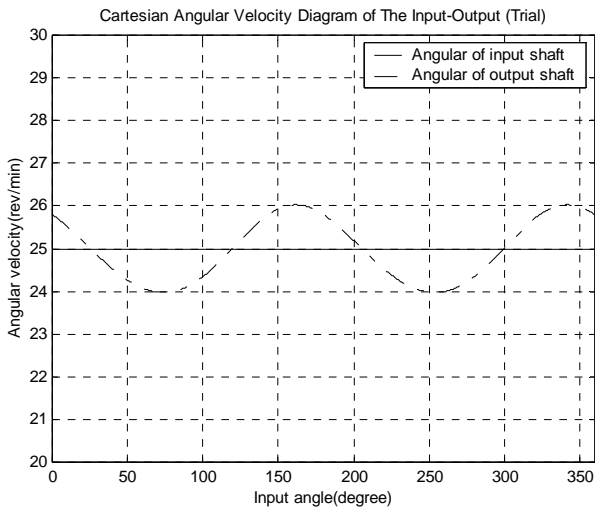
Purna proses berguna untuk menyimpan data hasil proses optimasi dalam file *result.dat*, caranya dengan mengetikkan perintah *save result* pada prompt di windows MATLAB. Juga berguna untuk menampilkan hasil optimasi dalam bentuk grafik koordinat polar atau dapat juga dalam bentuk grafik koordinat kartesian.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Optimasi dengan Pilihan 1

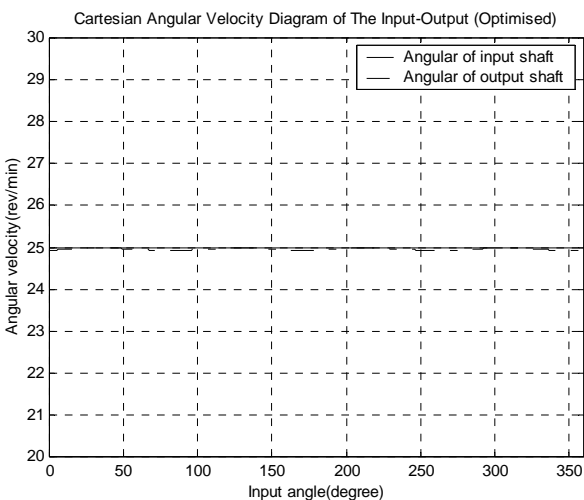
Dalam pilihan 1, variabel disainnya adalah sudut fasa  $\varphi$  yang akan dioptimalkan sedangkan sudut operasi  $\beta$  merupakan variabel tetap yang bebas ditentukan sesuai dengan kebutuhan kondisi peletakan komponen. Karena sistem ini menggunakan empat poros dengan tiga sambungan, maka sudut fasa yang akan dioptimalkan adalah  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ , dan  $\varphi_3$ . Pada permulaan optimasi harus ditentukan posisi awal sembarang (*trial*) dari sudut fasa. Misalnya dimasukkan sudut fasa  $\varphi_1 = 30^\circ$ ,  $\varphi_2 = 40^\circ$  dan  $\varphi_3 = 50^\circ$ , sedangkan sudut operasi diisi sesuai dengan kebutuhan atau kondisi peletakan komponen, misalnya sudut operasi  $\beta_1 = 15^\circ$ ,  $\beta_2 = 20^\circ$  dan sudut operasi  $\beta_3 = 9^\circ$ . Grafik masukan awal ini, dalam bentuk grafik koordinat kartesian, dapat dilihat seperti gambar dibawah. Dapat diamati bahwa dengan besar kecepatan sudut poros masukan (poros 1) 25 putaran/menit menghasilkan kecepatan sudut poros keluaran (poros 4) berfluktuasi

antara 24–26 putaran/menit atau dengan amplitudo sebesar 2 putaran/menit.



**Gambar 6. Grafik Kecepatan Sudut Poros Masukan-Keluaran dari Masukan Awal (*trial*) dengan Pilihan 1**

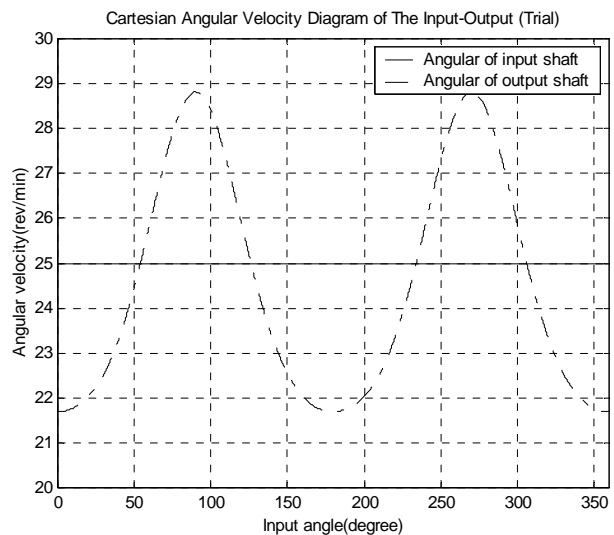
Selanjutnya dilakukan optimasi dengan menggunakan paket SSO. Setelah melakukan sebanyak 120 kali evaluasi fungsi obyektif dalam 28 iterasi, SSO memberikan solusi optimal  $x = 57.4233$  73.27490 (artinya disain optimum dicapai pada sudut fasa  $\varphi_1 = 57.4233^\circ$ ,  $\varphi_2 = 73.2749^\circ$  dan  $\varphi_3 = 0^\circ$ ). Jika harga sudut fasa hasil optimasi dimasukkan kedalam fungsi obyektif menghasilkan nilai 0.8521. Nilai ini jika semakin mendekati nol maka disain kopeling universal poros seri semakin baik artinya kecepatan poros masukan dan keluaran mendekati sama. Grafik hasil optimasi, dalam koordinat kartesian, dapat dilihat pada gambar dibawah. Dapat diamati bahwa sekarang besar kecepatan sudut poros masukan dengan poros keluaran sangat mendekati sama, walaupun ada fluktuasi namun sangat kecil.



**Gambar 7. Grafik Kecepatan Sudut Poros Masukan-Keluaran dari Hasil Optimasi dengan Pilihan 1**

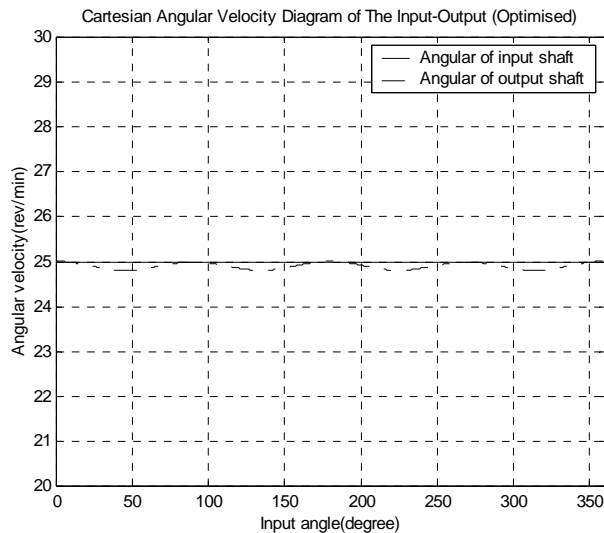
## Optimasi dengan Pilihan Pilihan 2

Dengan pilihan pilihan 2, variabel disainnya adalah sudut operasi  $\beta$  yang akan dioptimalkan sedangkan sudut fasa  $\varphi$  merupakan variabel tetap. Dalam paket SSO ini semua sudut fasa  $\varphi$  secara otomatis ditetapkan normal sebesar  $90^\circ$ . Seperti pada kasus sebelumnya, maka yang akan dioptimalkan adalah sudut operasi  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  dan  $\beta_3$ . Untuk memulai optimasi, lebih dulu ditentukan sembarang (*trial*) besarnya sudut operasi. Misalkan sudut operasi  $\beta_1 = 10^\circ$ ,  $\beta_2 = 15^\circ$  dan  $\beta_3 = 30^\circ$ . Grafik kondisi masukan awal ini dapat dilihat pada gambar dibawah. Dalam koordinat kartesian, terlihat jelas disini bahwa dengan besar kecepatan sudut poros masukan (poros 1) 25 putaran/menit menghasilkan kecepatan sudut poros keluaran (poros 4) berfluktuasi antara 22 – 29 putaran/menit atau dengan amplitudo sebesar 7 putaran/menit.



**Gambar 8. Grafik Kecepatan Sudut Poros Masukan-Keluaran dari Masukan Awal (*trial*) dengan Pilihan 2.**

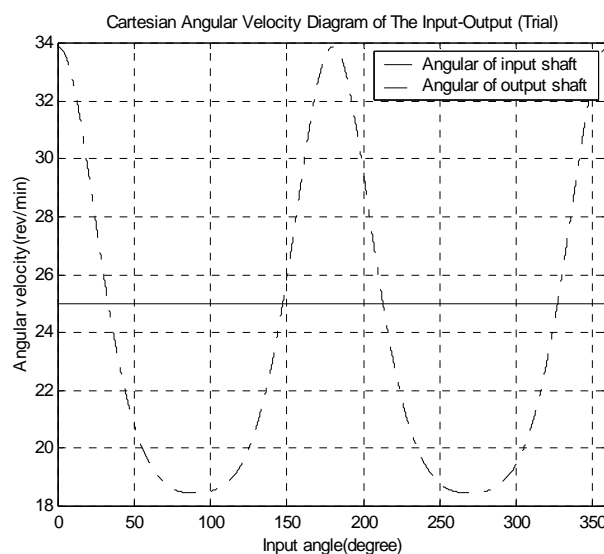
Selanjutnya dilakukan optimasi dengan menggunakan paket SSO. Setelah melakukan sebanyak 135 kali evaluasi fungsi obyektif dalam 22 iterasi, SSO memberikan solusi optimal  $x = 7.0000$  18.4473 25.0000. Hal ini menunjukkan bahwa besarnya sudut operasi  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  dan  $\beta_3$  yang optimum berturut-turut adalah  $7^\circ$ ,  $18.4473^\circ$  dan  $25^\circ$ . Jika harga sudut operasi hasil optimasi ini dimasukkan kedalam fungsi obyektif menghasilkan nilai sebesar 4.9108. Grafik koordinat kartesian hasil optimasi dapat dilihat dalam gambar dibawah, yang memperlihatkan bahwa harga kecepatan sudut poros keluaran sangat dekat atau hampir sama dengan kecepatan sudut poros masukan.



Gambar 9. Grafik Kecepatan Sudut Poros Masukan-Keluaran dari Hasil Optimasi dengan Pilihan 2

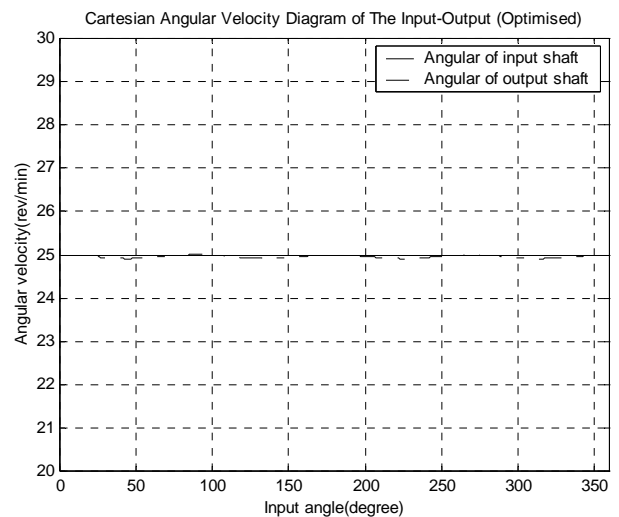
### Optimasi dengan Pilihan Pilihan 3

Dalam pilihan pilihan 3, variabel disainnya adalah sudut operasi  $\beta$  dan sudut fasa  $\phi$ . Sedang yang akan dioptimalkan adalah sudut operasi  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ , dan  $\beta_3$  serta sudut fasa  $\phi_1$ ,  $\phi_2$ , dan  $\phi_3$ . Untuk memulai optimasi ditentukan sembarang (*trial*) posisi awal dari sudut operasi. Misalkan sudut operasi  $\beta_1 = 30^\circ$ ,  $\beta_2 = 40^\circ$  dan  $\beta_3 = 50^\circ$ , dengan sudut fasa  $\phi_1 = \phi_2 = \phi_3 = 90^\circ$ . Grafik kondisi masukan awal ini dapat dilihat pada gambar dibawah. Dalam koordinat kartesian, terlihat jelas disini bahwa dengan besar kecepatan sudut poros masukan (poros 1) 25 putaran/menit menghasilkan kecepatan sudut poros keluaran (poros 4) berfluktuasi antara 18 – 34 putaran/menit atau dengan amplitudo sebesar 16 putaran/menit.



Gambar 10. Grafik Kecepatan Sudut Poros Masukan-Keluaran dari Masukan Awal (*trial*) dengan Pilihan 3.

Selanjutnya dilakukan optimasi dengan menggunakan paket SSO. Setelah melakukan sebanyak 297 kali evaluasi fungsi obyektif dalam 33 iterasi, SSO memberikan solusi optimal  $x = 15.8362$  10.0000 15.8387 90.0053 89.9695 90.0081. Ini artinya bahwa besar sudut operasi dan sudut fasa optimum untuk mendapatkan disain kopeling universal pada poros seri yang baik adalah sudut operasi  $\beta_1 = 15.8362^\circ$ ,  $\beta_2 = 10^\circ$  dan  $\beta_3 = 15.8387^\circ$  serta sudut fasa  $\phi_1 = 90.0053^\circ$ ,  $\phi_2 = 89.9695^\circ$ , dan  $\phi_3 = 90.0081^\circ$ . Jika harga sudut operasi dan fasa hasil optimasi ini dimasukkan kedalam fungsi obyektif menghasilkan nilai sebesar 1.0605. Grafik koordinat kartesian hasil optimasi dapat dilihat dalam gambar dibawah, yang memperlihatkan bahwa harga kecepatan sudut poros keluaran sangat dekat atau hampir sama dengan kecepatan sudut poros masukan.



Gambar 11. Grafik Kecepatan Sudut Poros Masukan-Keluaran dari Hasil Optimasi dengan Pilihan 3

## KESIMPULAN

Dari hasil penelitian ini maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. MATLAB *optimisation toolbox* dengan fungsi *fmincon* secara umum dapat digunakan untuk memecahkan dalam persoalan disain mekanisme dalam bentuk sebuah persoalan pemrograman tak linier.
2. Dari sejumlah percobaan yang dilakukan, paket SSO mampu menghasilkan disain poros seri yang disambung dengan kopeling universal dengan kualitas yang baik yaitu memiliki kecepatan sudut keluaran yang hampir ideal.
3. Dari sejumlah percobaan (tidak semua ditampilkan disini) dengan menggunakan paket SSO menunjukkan kecenderungan bahwa besar kecepatan sudut poros keluaran akan ideal mendekati atau hampir sama dengan kecepatan sudut poros masukan jika besar sudut operasi  $\beta$  lebih kecil daripada  $25^\circ$  dan sudut fasa  $\phi$  pada  $90^\circ$ .

## DAFTAR PUSTAKA

1. Shigley, E.S. and Uicker, J.J.Jr. *Theory of Machines and Mechanisms*, Mc Graw Hill Inc., Tokyo, 1980.
2. J.S. Rao and R.V.Dukkipati. *Mechanisms and Machine Theory*, Mc Graw Hill Book Company, New Delhi, India, 1989.
3. George H Martin. *Kinematics and Dynamics of Machines*, Mc Graw Hill Book Company, New York, 1982.
4. Thomas Coleman, Mary Ann Branc and Andrew Grace. *Optimisation Toolbox for Use with MATLAB*, The MathWorks Inc, USA, 1990.
5. Biggs, M.C. *Constrained Minimisation Using Recursive Quadratic Programming*, Toward Global Optimisation (L.C.W.Dixon and G.P. Szergo, eds), North Holland, 1975, pp 341-349.
6. Han, S.P. *A Globally Convergent Method for Non Linear Programming*, Journal Optimisation Theory and Application, vol 22, 1977. p 297.
7. M.J.D. Powell. *A Fast Algorithm for Non Linear Constrained Optimisation Calculation*, Numerical Analysis, G.A.Watson ed. Lecture Notes in Mathematics, Springer Verlag, vol 630, 1978.
8. M.J.D. Powell. *The Convergence of Variable Metric Method for Nonlinearly Constrained Optimisation Calculations*, Non Linear Programming 3 (O.L. Mangansarian, R.R. Meyer and S.M. Robinson eds), Academic Press, 1978.
9. Fletcher, R. *A New Approach to Variable Metric Algorithm*, Computer Journal, vol 13, 1970. pp 317-322.
10. Gill, P.E., W. Murray, and M.H. Wright. *Practical Optimisation*, Academic Press, London UK, 1981.
11. M.J.D. Powell, *Variable Metric Method for4 Constrained Optimisation*, Mathematical Programming: the State of the Art (A. Bachem, M. Grottschel and B. Korte .eds), Springer Verlag, 1983. pp 288-311.
12. Hock, W. and K. Schittowski. *A Comparative Performance Evaluation of 27 Non Linear Programming Codes*, Computing Journal, vol 30, 1983. pp 335.